

# FPSO의 온배수를 활용한 해수 DTEC 발전시스템에 대한 연구

† 송영욱

† 한국해양대학교 보조기계연구실 선임연구원/(주)펜타텍

## A Study on the Sea Water DTEC Power Generation System of the FPSO

† Young-Uk Song

† Auxiliary Machine Laboratory of National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea /Pentatech

**요약** : 인류의 한정된 석유자원의 개발은 유가의 상승과 함께 필연적으로 심해지역의 유전을 탐사하고 개발하고 있다. 이러한 심해지역에는 심층수의 온도가 약 4℃이고 표층수의 온도는 약 30℃로 이때의 온도 차이를 이용하여 발전설비를 가동하는 Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 기존의 심해지역에 설치되는 FPSO(Floating Production Storage Offloading; 부유식 생산설비)에서 수심 100m의 해수를 냉각수로 이용하는 조건을 400m까지 변경하는 조건으로 하고, FPSO에서 냉각수로 사용되고 배출되는 해수를 이용하여 Discharged Thermal Energy Conversion(DTEC) 발전장치를 적용하는 방안을 설계하고 해석하였다. 기존의 설계 수심보다 깊은 수심에서 냉각수를 취수하여 DTEC 시스템을 적용하면 수심에 따라 보다 많은 전력을 생산할 수 있는 시스템의 설계가 가능한 것을 확인하였다. FPSO와 OTEC 발전설비의 유사성을 고려하였을 때, 심해지역의 FPSO에 DTEC 시스템을 적용하여 기술을 축적하고 유전의 수명이 다한 뒤에 OTEC 발전설비로 개조한다면 자원개발과 지속가능한 발전이라는 두 가지 중요한 과제를 이룰 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 냉각수, 부유식 생산설비, 온도차 발전, 온배수, 해수, OTEC, DTEC

**Abstract** : The development of limited petroleum resources for use with mankind inevitably explores and seeks to develop oil fields in the deep sea area, under the rise of the oil prices market situation. The use of Oceanic Thermal Energy Conversion (OTEC) technology, which operates the power generation facility using the temperature differences between the deep water and the surface water, is progressing actively as a trend to follow. In this study, the application of the Discharged Thermal Energy Conversion (DTEC) was designed and analyzed under the condition that the supply condition of seawater used in the FPSO installed in the deep sea area is changed up to 400m depth. In this case, it was confirmed that the design of the system that can generate more electric power according to the depth of water is confirmed, by thus applying the DTEC system by taking the cooling water at a deeper water depth than the existing design water depth. The FPSO considers the similarity of the OTEC power generation facilities, and will apply the DTEC system to FPSO in the deep sea area to accumulate technology and the conversion to further utilize the OTEC power generation facilities after the end of life cycle of oil production, which could be a solution to two important issues, namely, resource development and sustainable development.

**Key words** : Cooling Water, Deep Sea Water, DTEC, Energy Conversion, FPSO, OTEC

### 1. 서 론

인류는 19세기말부터 석유자원을 개발하여 문명발전의 에너지원으로 사용하였다. 현재까지 탐사하고 개발되어온 대형 유전은 육지, 대륙붕, 심해저에 분포되어있다. 종래의 채산성이 높았던 육지와 천해 지역의 유전개발은 한계에 이르러 더 이상 생산량의 증가가 어려워졌고 더 멀고 깊은 열악한 환경의 바다 속에서 석유자원을 탐사하고 개발하고 있다.[1]

이러한 석유자원의 개발환경은 유가의 변동과 세계의 경제성장률과도 밀접한 연계되어 있다. 2000년대 초반의 세계경기의 호황에서 유가는 배럴당 100불이 넘게 치솟았고 높은 생산단가로 주저했던 오일 메이저들은 열악한 환경의 심해저 유전 개발에도 박차를 가하였다.

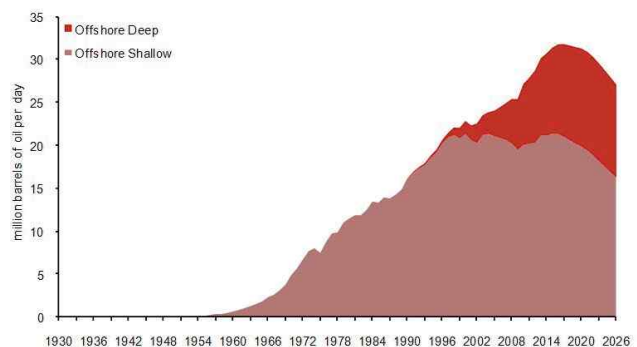


Fig. 1 Global oil production outlook (Source: Douglas westwood world deepwater market report 2010-2014) [1]

† Corresponding author : 정희원, benedictsong72@gmail.com 051)403-1245

한편 채산성이 부족하였던 육상 압반층의 셰일 가스는 채굴기술의 발전에 힘입어 채굴량이 급격하게 증가하여 유가는 50에서 60불 전후로 조정되어가는 형국이다.

그러나 지하에 매장되어있는 석유자원은 무한자원이 아니고 언젠가는 고갈될 것이 확실하므로 인류가 대체에너지를 개발하기 전까지는 절약하여야만하고 후손에게 남겨주어야 할 유산임에 틀림이 없다.

Fig. 2에서와 같이 최근 EIA에서 발간된 에너지 전망에 따르면 세계의 에너지 소비량은 2015년에서 2040년 사이에 28%의 성장을 예상하고 있다. 아직 non-OECD 국가들의 개발과 발전에 더 많은 석유자원과 에너지가 필요하다는 전망이다.[2]

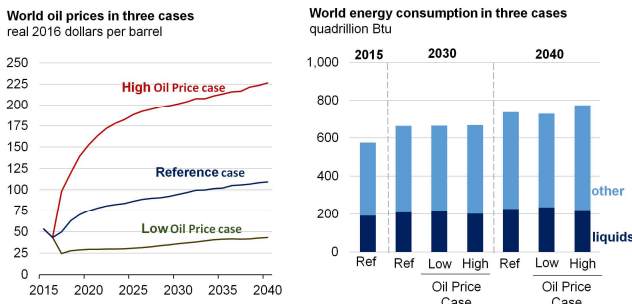


Fig. 2 World energy consumption in reference case (Source: International Energy Outlook 2017 from EIA) [2]

이러한 대외 환경에서 앞으로 심해유전의 개발은 필연적으로 증가하게 될 것이고, FPSO(Floating Production Storage Offloading)같은 생산설비도 증가하게 될 것이다. 심해 유전의 FPSO 설치 환경 조건에서는 심층수의 온도가 낮으므로 플랜트에서는 배출되는 냉각수의 온배수를 이용하여 온도차 발전 기술을 추가 적용하는 방안이 검토될 수 있다.

온배수를 이용한 DTEC(Discharged Thermal Energy Conversion) 발전시스템은 해양 온도차 발전기술인 OTEC(Ocean Thermal Conversion Energy)으로부터 유래하였다. OTEC 발전기술은 적도에서 위도 24이내의 수심 1000m이하의 해역에서 약 4℃의 심층수와 약 30℃의 표층수와 온도 차이를 이용하여 암모니아 등의 작동유체가 증발하고 응축할 때 발생하는 기체로 터빈을 구동하여 전기 에너지를 얻는 기술이다. 이러한 OTEC의 경우 온도 차이가 약 20℃이상 되어야 효율 있는 에너지 생산이 가능하기 때문에 대부분 적도 인근해역에서 적용이 가능하다. 이를 해결하기 위해 일본이나 우리나라에서는 원자력 발전소의 온배수를 이용한 DTEC 발전시스템이 시도되고 있다.[3][4]

DTEC은 OTEC과 동일한 발전원리이나 OTEC을 적용할 수 없는 지역에서 다양한 설비의 배출수를 이용하여 에너지를 회수할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 현재 설계되고 개발되어 적용중인 심해지역의 일반적인 FPSO의 냉각시스템에서 공급되는 냉각수의 수

심에 변화를 주어 추가적으로 DTEC 발전시스템을 적용하여 연료의 추가 소비 없이 전력을 생산할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 한편 심해 FPSO에서의 온도차 발전시스템의 적용으로 인한 기술 축적을 계기로 하여 향후 OTEC 설비로의 전환하는 방안을 제시하여 주로 후진 개발도상국에 분포되어있는 심해유전의 미래자원 고갈에 대한 새로운 대응방안을 제시하고자 한다.

## 2. 심해저 해양플랜트 FPSO

### 2.1 심해저 FPSO의 사례

최근에 심해유전 개발에 투입되는 FPSO의 사례를 보면 서부 아프리카의 나이지리아 OML 130 유전에 투입되는 EGINA FPSO는 수심 1,750m에 달하고, 앙골라 BLOCK 32 유전에 투입되는 KAOMBO FPSO는 수심이 1,950m나 되고 육지로부터는 약 200~300km 떨어져있다. 이들 심층수의 온도가 약4℃이고, 표층수의 온도는 약 30℃가 된다. [5]

Fig. 3은 서부 아프리카의 심해지역의 FPSO가 설치되는 지역의 수심변화에 대한 해수의 평균 온도이다. 수심 400m까지 급격하게 온도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 심층수와 표층수 또는 온배수와 표층수와의 온도 차이를 이용한 발전 기술을 적용할 수 있는 최적의 조건이다.

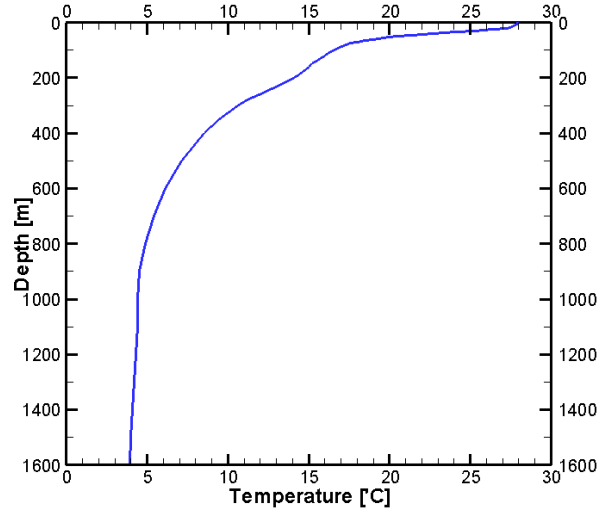


Fig. 3 Ocean temperature of west africa (OML 130)

### 2.2 FPSO의 해수 냉각 시스템

FPSO에서 해수는 생산설비의 냉각 시스템과 정유 생산설비의 각 단계에 다양하게 이용되어진다. Sea Water Lifting Pump로부터 공급되는 해수는 Cooling Water Exchanger를 지나 승압펌프를 거쳐서 생산설비와 Settling Water등으로 공급되고 Riser를 통해서 Reservoir로 재 투입되어지고 냉각수 등으로 이용된 해수는 Water Disposal Caisson으로 모여서

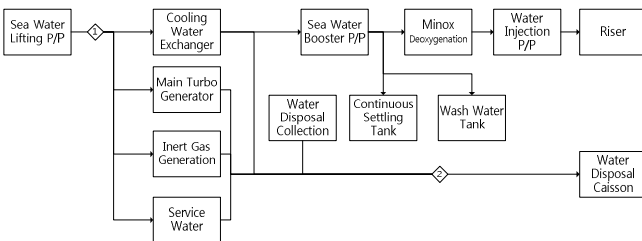
선외로 배출되어진다. Fig.4 a)에서는 FPSO에 적용되는 전형적인 해수 냉각시스템을 블록다이어그램으로 표현하였다. 심해저에 설치되는 해양플랜트의 경우, 해수는 저온의 해수를 공급하기위해서 해저 약100m 수심에서 끌어들여서 사용하는데 이때 해수의 평균 온도는 16.6℃, 유량은 약 8,000m<sup>3</sup>/h이고 선외로 배출되는 해수의 온도는 약 35℃이고 유량에는 큰 차이가 없다. 이 때에 수심을 더 낮은 200m에서 끌어들일 수 있도록 Sea Water Lifting Pump의 배관을 연장하면 14.1℃의 해수를 DTEC의 냉각수로 하는 발전시스템을 구성할 수 있다. Table 1에서 수심 100m와 400m 사이에서의 최저온도와 최고온도를 확인할 수 있다.

Table 1 Temperature of sea water of sea water lifting pump suction to FPSO.

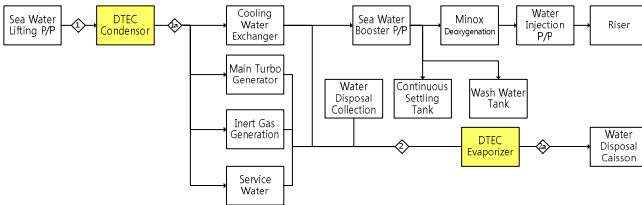
Depth (m)	Temperature (°C)		
	Mean	Min	Max
100	16.6	14.1	19.8
200	14.1	11.8	16.3
300	10.6	8.5	12.8
400	8.5	6.8	10.6

(Source: OML 130 ocean temperature data from project report)

Fig. 4 b)의 블록다이어그램에서 제시된 냉각시스템은 200m이하의 심층해수를 이용하여 DTEC의 저온 냉각수로 이용하고, 배출되는 온배수를 열원으로 사용하는 방안을 제시한 것이다.



a) Sea water cooling block diagram of conventional FPSO



b) Alternative sea water cooling block diagram of FPSO

Fig. 4 Sea water cooling system of FPSO with alternative DTEC application

이 경우 DETC의 냉각수로 이용된 후 FPSO로 유입되는 냉각수의 온도는 기존의 100m의 해수온도와 동일하게 16.6℃로 설계가 가능하므로 FPSO의 다른 시스템의 설계조건에 영

향을 주지 않고 배출되는 해수의 온도와 동일한 조건을 유지할 수 있다.

### 3. FPSO의 OTEC 시스템 적용과 열 해석

#### 3.1 작동유체 선정과 시스템 해석 조건

DTEC에는 R717(암모니아) 냉매가 작동유체로 사용되어진다. 암모니아는 산업분야에서 1930년대부터 사용되어 왔으며 일반적으로 가장 효율적인 냉매로 알려져 있다. 끓는점이 낮고, 환경영향이 극히 적은데다가 에너지 효율이 매우 높다. 암모니아는 오존고갈지수(ODP)가 0이고 지구온난화지수(GWP)도 0으로 친환경적으로 냉매이다.[6]

시스템의 설계와 해석에는 상용공정해석 프로그램인 Aspen사의 HYSYS 10.0v를 사용하였으며 상태방정식(Fluid Package)은 Peng-Robinson을 적용하였다.

#### 3.2 지배방정식

Peng-Robinson 방정식은 다음과 표현된다.[7]

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (1)$$

여기에서

$$a = a_c \alpha$$

$$a_c = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b = 0.077480 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$\sqrt{\alpha} = 1 + k(1 - T_r^{0.5})$$

$$k = 0.37464 + 1.5422\omega - 0.26992\omega^2$$

엔탈피 계산은 다음 식(3)으로 계산되어진다.

$$H - H^{IG} = PV - RT - \left( a - \left( \frac{da}{dT} \right) T \right) \frac{1}{2\sqrt{2}b} \ln \frac{V+b(1+\sqrt{2})}{V+b(1-\sqrt{2})} \quad (3)$$

엔트로피 계산은 다음식(4)로 계산되어진다.

$$S - S^{IG} = R \ln \left( \frac{V-b}{RT} \right) - \frac{1}{2\sqrt{2}b} \ln \left( \frac{V+b(1+\sqrt{2})}{V+b(1-\sqrt{2})} \right) \frac{da}{dt} \quad (4)$$

온도차 발전 사이클에서 주요 성능 변수는 열교환기의 성능에 좌우되며 열교환기의 Heat Balance는 식(5)와 같이 정의되어진다.

$$Balance Error = (M_{cold}[H_{out} - H_{in}]_{cold} - Q_{leak}) - (M_{hot}[H_{in} - H_{out}]_{hot} - Q_{loss}) \quad (5)$$

총 열전달양은(Duty)은 식(6)과 같이 정의되어 진다.

$$Q = UA\Delta T_{LM}F_t \quad (6)$$

여기에서

$U$  = overall heat transfer coefficient

$A$  = surface area available for heat transfer

$\Delta T_{LM}$  = log mean temperature difference (LMTD)

$F_t$  = LMTD Correction Factor

### 3.3 FPSO 냉각수 DTEC 시스템의 설계와 해석

Closed 사이클의 DTEC 시스템에서 따뜻한 해수는 기화기에서 작동유체인 암모니아를 증발시킨다. 증발된 기체는 압력이 상승하고 팽창하며 증기터빈을 구동하고 구동한 터빈은 축에 연결된 발전기를 구동하여 전력을 생산한다. 터빈을 구동한 암모니아 기체는 콘덴서에서 저온의 냉각수에 의하여 냉각되고 액화되어진다. 액화된 작동유체는 펌프에 의해 승압되어 다시 증발기로 순환되는 사이클을 형성한다.

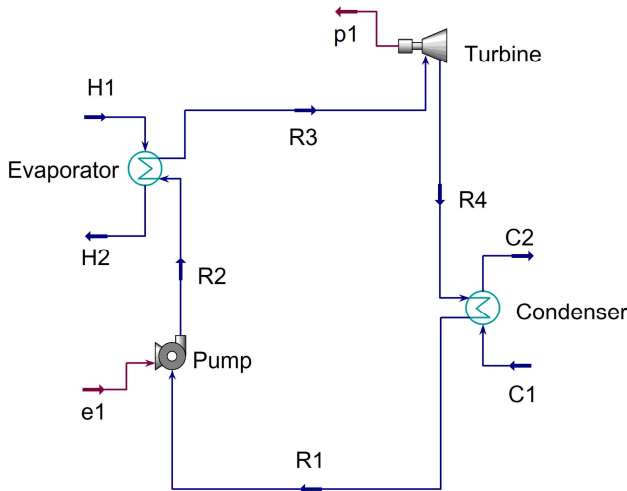


Fig. 5 A System configuration of closed cycle OTEC

Fig. 5와 같이 시스템을 구성하고 수심 200m에서 공급되는 14.1°C의 냉각수와 35°C의 온배수가 FPSO로부터 배출되는 조건으로 해석하였다.

Evaporator에 H1으로 공급되는 온배수의 온도는 35°C이고, 유량은 8,000m<sup>3</sup>/h이다. 이때, 작동유체인 암모니아 출구 측 R3의 온도를 30°C에서 포화기체로 증발되는 조건으로 설정하여 압력은 1,166kPa이고 유량은 72,033kg/h이다. 배출되는 온배수 출구 측 H2의 온도는 31.5°C이다. Evaporator에서 증발된 암모니아는 터빈을 구동하여 전력을 생산하고 Condenser에서 응축되어진다.

Condenser로 유입되는 냉각수 C1의 온도는 14.1°C이고, 유량은 8,000m<sup>3</sup>/h이다. Condenser 출구 측의 암모니아는 19°C에서의 포화 액체 조건으로 설정하여 압력은 829.2kPa가 되고, 냉각수의 출구의 온도는 16.6°C가 된다.

Condenser에서 액화된 작동유체는 펌프에 의해 승압되어 Evaporator로 다시 순환되어지고 지속적으로 터빈을 구동하

는 순환 사이클을 형성한다.

Table 2에서 시스템해석 결과에 따른 각 유체의 Heat Balance와 Material Balance 상태를 확인 할 수고, Table 3에서 Evaporator와 Condenser의 Duty를 포함한 해석결과를 확인할 수 있다.

Table 2 Material stream of DTEC - Case 1(200m Depth).

Stream	Unit	R1	R2	R3	R4
Vapor Fraction		0	0	1	0.985
Temperature	°C	19	19.1	30	11.34
Pressure	kPa	829	1216	1166	643.2
Mass flow	kg/h	72033	72033	72033	72033
Molar Enthalpy	kJ/kgmole	-11869	-11855	9221	8748
Molar Entropy	kJ/kgmoleC	65.04	65.05	136	135.2
Liq. Vol flow	m <sup>3</sup> /h	116.6	116.6	116.6	116.6

Stream	Unit	C1	C2	H1	H2
Vapor Fraction		0	0	0	0
Temperature	°C	14.1	16.6	35	32.5
Pressure	kPa	200	150	200	150
Mass flow	kg/h	8.1x10 <sup>6</sup>	8.1x10 <sup>6</sup>	8.1x10 <sup>6</sup>	8.1x10 <sup>6</sup>
Molar Enthalpy	kJ/kgmole	-2.86x10 <sup>5</sup>	-2.87x10 <sup>5</sup>	-2.85x10 <sup>5</sup>	-2.86x10 <sup>5</sup>
Molar Entropy	kJ/kgmoleC	50.81	51.48	56.27	55.62
Liq. Vol flow	m <sup>3</sup> /h	8000	8000	8000	8000

Table 3 Performance results of heat exchanger - Case 1

Performance	unit	Evaporator	Condensor
Duty	kJ/h	8.915x10 <sup>7</sup>	8.721x10 <sup>7</sup>
UA	kJ/C-h	1.05x10 <sup>7</sup>	1.99x10 <sup>7</sup>
Min. Approach	°C	5.0	4.2
LMTD	°C	8.5	4.4
Hot Pinch Temp	°C	35	20.8
Hot Pinch Temp	°C	30	16.6

한편 터빈에서의 효율은 실제 작동유체의 팽창과정에서 발생하는 출력과 등 엔트로피 팽창에서 발생하는 출력의 비율로 계산되어진다. 본 연구에서 터빈의 Isentropic 효율은 75% 설정하였다.

$$Efficiency(\%) = \frac{Fluid\ power_{actual}}{Fluid\ power_{isentropic}} \times 100\% \quad (7)$$

기계적으로 가역 가능한 과정에서의 일은 다음 식으로 정의되어진다.

$$W = \int V \Delta P \quad (8)$$

$W$  = work

$V$  = volume

$\Delta P$  = pressure difference

터빈에서 입출구의 온도와 압력이 정의되었을 때, 생성되는 출력은 입구와 출구의 열량 차이와 동일하다.

$$Power\ Produced_{actual} = Heat\ Flow_{inlet} - Heat\ flow_{outlet} \quad (9)$$

해석 결과 터빈에서의 출력은 556kW의 Power를 얻을 수 있다. Table 4에서 터빈의 해석 결과를 확인할 수 있다.

Table 4 Performance results of turbine - Case 1

Performance	unit	Evaporator
Adiabatic Head	m	3777
Polytropic Head	m	3791
Adiabatic Fluid Head	kJ/kg	37.04
Potential Fluid Head	kJ/kg	37.18
Isentropic Efficiency	%	75.00
Polytropic Efficiency	%	74.72
Power Produced	kW	556

DTEC 발전시스템에서 발생하는 실제 유효출력은 터빈에서 발생하는 출력으로부터 시스템 구동에 필요한 해수펌프 및 작동유체 펌프에 소요되는 동력을 제외하여야 한다. 본 연구에서 설계된 DTEC 발전시스템에서는 기존의 FPSO에서 사용되어지고 있는 Sea Water Lifting Pump를 해수펌프로 사용하고 있으므로 해수펌프 동력은 고려하지 않는다. 따라서 순 유효출력은 식(10)과 같이 얻을 수 있다.

$$Net\ Power = Power_{turbine} - Power_{fluid\ pump} \quad (10)$$

작동유체펌프에서 소요되는 동력은 16.9kW이다. 따라서 시스템의 유효출력은 539.1kW이다.

즉, 기존에 설치되는 FPSO의 Sea Water Lifting Pump의 흡입 측 배관인 Caisson의 깊이를 100m 깊게 설치하는 경우 539.1kW의 전력을 생산할 수 있다.

그렇다면 보다 깊은 수심에서 냉각수를 취수한다면 더 높은 전력을 얻을 수 있을 것이다.

다음은 동일한 시뮬레이션 조건에서 작동유체의 온도 설정 조건은 고정하여 두고 냉각수를 수심 300m에서 유입되는 조건인 10.6°C로 설정을 하고, 배출되는 해수의 온도를 기존 FPSO의 냉각수 온도인 16.6°C로 고정하였을 때의 해석 결과이다.

Table 5에서 시스템 해석 결과에 따른 각 유체의 Heat Balance와 Material Balance 상태를 확인 할 수고, Table 6에서 Evaporator와 Condenser의 Duty를 포함한 해석결과를 확인할 수 있다.

수심 300m를 냉각수로 사용할 때의 조건을 Case 2로 하여 해석한 결과에서 작동유체인 사이클은 온도를 고정한 상태이므로 유량변동만 발생한다. 증가된 작동유체의 유량은 280.7m<sup>3</sup>/h이다.

Table 5 Material stream of DTEC - Case 2(300m).

Stream	Unit	C1	C2	H1	H2
Vapor Fraction		0	0	0	0
Temperature	°C	10.6	16.6	35	28.9
Pressure	kPa	200	150	200	150
Mass flow	kg/h	8.1x10 <sup>6</sup>	8.1x10 <sup>6</sup>	8.1x10 <sup>6</sup>	8.1x10 <sup>6</sup>
Molar Enthalpy	kJ/kgmole	-2.87x10 <sup>5</sup>	-2.87x10 <sup>5</sup>	-2.85x10 <sup>5</sup>	-2.86x10 <sup>5</sup>
Molar Entropy	kJ/kgmoleC	49.85	51.48	56.27	54.71
Liq. Vol flow	m <sup>3</sup> /h	8000	8000	8000	8000

Table 6 Performance result of heat exchanger - Case 2

Performance	unit	Evaporator	Condensor
Duty	kJ/h	2.145x10 <sup>8</sup>	2.099x10 <sup>8</sup>
UA	kJ/C-h	3.02x10 <sup>7</sup>	3.65x10 <sup>7</sup>
Min. Approach	°C	5.0	4.2
LMTD	°C	7.1	5.8
Hot Pinch Temp	°C	35.0	20.8
Hot Pinch Temp	°C	30.0	16.6

터빈에서 발생하는 출력은 1,338kW이고, 작동유체 펌프에 소요되는 동력은 40.5kW이다. 식(10)에 따라서 시스템의 유효 출력은 1297.5kW이다.

수심 200m에서의 Case 1과 의 해석결과를 비교해보면 작동유체의 유량이 증가하였고, Condenser와 Evaporator의 총 열전달량(Duty)가 2.4배 증가하였다. 열교환기에서 보다 높은 온도차이가 발생하므로 보다 크고 효율이 높은 열교환기의 설계가 요구되어진다.

Table 7 Material stream of DTEC - Case 3(400m).

Stream	Unit	C1	C2	H1	H2
Vapor Fraction		0	0	0	0
Temperature	°C	8.5	16.6	35	26.7
Pressure	kPa	200	150	200	150
Mass flow	kg/h	8.1x10 <sup>6</sup>	8.1x10 <sup>6</sup>	8.1x10 <sup>6</sup>	8.12x10 <sup>6</sup>
Molar Enthalpy	kJ/kgmole	-2.87x10 <sup>5</sup>	-2.87x10 <sup>5</sup>	-2.85x10 <sup>5</sup>	-2.86x10 <sup>5</sup>
Molar Entropy	kJ/kgmoleC	49.28	51.48	56.27	54.15
Liq. Vol flow	m <sup>3</sup> /h	8000	8000	8000	8000

Table 8 Performance result of heat exchanger - Case 3

Performance	unit	Evaporator	Condensor
Duty	kJ/h	2.898x10 <sup>8</sup>	2.835x10 <sup>8</sup>
UA	kJ/C-h	4.67x10 <sup>7</sup>	4.36x10 <sup>7</sup>
Min. Approach	°C	5.0	4.2
LMTD	°C	6.2	6.5
Hot Pinch Temp	°C	35.0	20.8
Hot Pinch Temp	°C	30.0	16.6

동일한 방법으로 400m에서의 8.5°C의 냉각수를 취수 하였을 때는 작동유체의 유량은 379.2m<sup>3</sup>/h로 증가하고 터빈에서

발생하는 출력은 1,807kW가 된다. 소요되는 작동유체의 동력은 54.8kW로 시스템의 유효출력은 1,752kW이다. Table 7과 Table 8에서 냉각수의 해석결과와 열교환기의 성능지수들을 확인할 수 있다.

수심 200m에서의 Case 1과의 해석결과를 비교해보면 작동유체의 유량은 379.2m<sup>3</sup>/h 증가하였고, Condenser와 Evaporator의 총 열전달량(Duty)가 3.2배 증가하였다. 열교환기에서 보다 높은 온도차이가 발생하므로 보다 효율이 높은 열교환기의 설계가 요구되어진다.

Fig. 6에서 수심변화에 따른 해석결과에 대한 Condenser와 Evaporator의 열교환기의 성능을 그래프에서 확인할 수 있다.

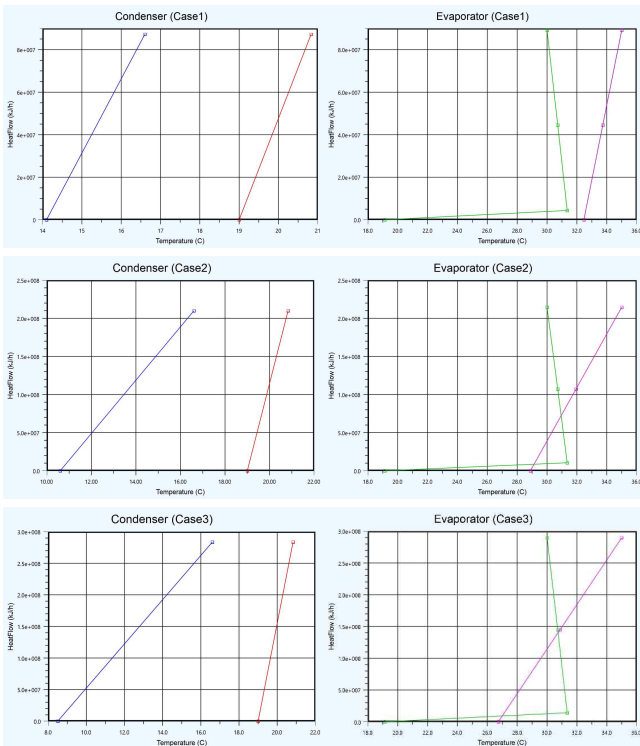


Fig. 6 Performance results of heat exchanger in 3 case

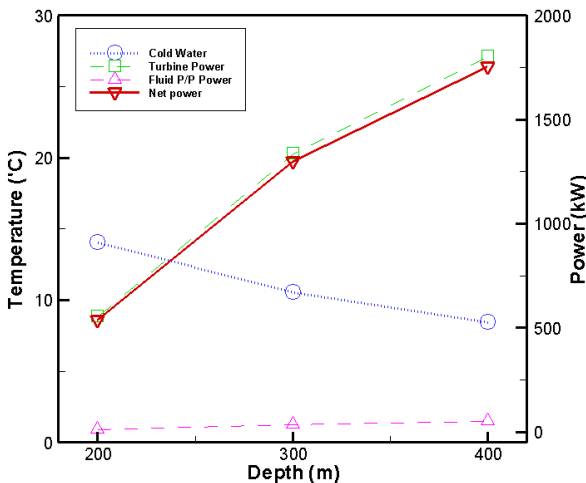


Fig. 7 Comparison of DTEC power by cooling water depth

Fig. 7은 수심 200m부터 400m까지 깊은 수심으로부터 냉각수를 취수하는 조건으로 암모니아를 작동유체로 하여 DTEC시스템을 해석한 결과이다. 수심에 증가하면서 온도가 감소함에 따라 터빈의 출력증가와 작동유체 펌프에 소요되는 동력을 그래프에서 확인할 수 있다.

수심에 따라 온도 변화량에도 차이가 있어 깊은 수심으로부터 취수할 경우 Cooling Water Pipe(CWP)의 무게도 함께 증가되므로 이를 지탱하기위한 보강된 구조의 설계 조건을 고려하여 취수 수심을 설정하여야 할 것이다.

최근에 SBM사 및 TECHNIP사에서는 FPSO의 설계 경험을 바탕으로 FPSO와 OTEC 플랜트의 유사점을 바탕으로 연구한 결과로 CWP 및 열교환기의 설계 적용 방안을 제시하고 100MW급 이상의 초대형 OTEC 플랜트의 가능성을 제시하였다.[8][9]

일반적으로 FPSO는 화물을 적재하는 선체(HULL)와 선실 구역(Accommodation)과 생산설비(Topside) 모듈로 구성되어 있다. 선체구역에는 FPSO전체에 공급되는 보조기계(Utility)가 포함되어 있다. 해상에서 플랜트를 운영할 수 있는 완벽한 안전장비와 통신시스템 등을 갖추고 있다. 발전설비는 설비마다 차이가 있지만 프로젝트의 사례를 보면 25MW급 터보발전기 4기, 4.5MW급의 디젤발전기2기와 2MW의 비상발전기를 갖추고 있다. 수명이 완료한 심해 FPSO를 기존의 발전설비와 함께 생산설비 모듈을 OTEC 설비로 개조하여 대체한다면 경쟁력 있는 OTEC 플랜트로 전환이 가능할 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 앞으로 증가가 예상되는 심해지역 또는 극심해지역 FPSO를 설계하고 개발할 때, 사용되는 냉각수를 기존의 취수 수심인 100m보다 낮은 200~400m의 저온의 해수를 취수하는 조건으로 하여 작동유체를 암모니아로 하는 DTEC 발전시스템을 설계하고 해석하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수심 200m에서 취수하는 경우 14.1°C의 냉각수를 이용하는 DTEC 발전시스템을 설계하여 유효출력은 539.1kW를 얻을 수 있었다. 동일한 작동유체의 설계조건에서 300m의 수심의 경우에는 10.6°C의 냉각수를 이용하여 1,297.5kW, 400m의 수심의 경우에는 8.5°C의 냉각수를 이용하여 1,752kW의 유효출력을 얻을 수 있었다.

2. 유전의 개발에서 원유생산 수명은 약 20~25년 정도로 설계가 된다. 이러한 심해저 FPSO의 개발 단계부터 심층수의 에너지를 활용하는 DTEC 온도차 발전기술을 적용하여 그 기술을 축적하고, 유전의 수명이 다한 이후에는 OTEC 발전설비로 개조하는 방안을 적용한다면 친환경 개발에 관한 문제뿐만 아니라 국가적인 관점에서 자원개발과 지속가능한 발전이라는 두 가지 중요한 과제를 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] Binger, A.(2004) 'Potential and Future Prospects for Ocean Thermal Energy Conversion(OTEC) in Small Islands Developing States(SIDS)'.
- [2] EGINA FPSO PROJECT, KAOMBO FPSO PROJECT  
www.total.com.
- [3] Hughes, C. "Developments in the deepwater sector",  
www.deloitte.co.uk/energybriefings.
- [4] Jung, H.(2010), "Feasibility Study on modified OTEC(Ocean Thermal Energy Conversion) by Plant Condenser Heat Recovery", ResearchGate.
- [5] Kibbee, S.(2013), 'Ocean Thermal Energy Conversion at SBM', Proceedings of the 18th Offshore Symposium.
- [6] Provost, J.(2016), "Our Technip Technology for Energy Conversion", 4th International OTEC Symposium.
- [7] R717(Ammonia) Product details, www.linde-gas.kr.
- [8] Thermodynamic Calculation Model.(2009), Hysys manual, AspenTech.
- [9] World Energy Consumption in Reference Case, International Energy Outlook(2017), EIA.

---

Received 18 January 2018

Revised 26 February 2018

Accepted 26 February 2018

